

長面浦への流入塩分と浦内 DO の変動機構に関する研究

金里 学¹・Purwanto Beki Santoso²・田中 仁³
金山 進⁴・高崎みつる⁵・山路弘人⁶

宮城県石巻市の長面浦は強い閉鎖性を有し、長年にわたりカキの養殖が行われてきた。しかし、近年貧酸素水塊によるカキの斃死が認められる。そこで本研究では、2002 年より行われている現地観測を 2004、2005 年も引き続き行い、観測データを元に、浦内の流動・水質特性を解明した。また浦内の水質環境は、狭水路からの流入水の影響を大きく受けている。そこで流入水を支配する風と隣接河川の北上川流量から、ニューラルネットワークと 3 次元密度流モデルを用いて流入水塩分のシミュレーションを行った。さらにニューラルネットワークによる長期シミュレーション結果から、流入水塩分の変動が浦内へ与える影響について検討を行った。

1. はじめに

沿岸域は陸域と海域の接点として、多様で豊かな自然を有し、独特の生態系を有する。特に浦や内湾といった閉鎖性水域は養殖場などに利用され、周辺住民の生活の基盤となっている。しかし、一方で水が滞りやすく、水質悪化を助長させる一面も持つ。近年においては人的影響による水域への負荷の増加によって、富栄養化などの問題が生じ、解決が急がれている水域も多い(例えば、入江ら, 2000)。

調査対象である長面浦では、その静穏さを活かしてカキの養殖が行われているが、生産規模の拡大と共に底質が悪化し、貧酸素水塊の発生と酸欠によるカキの斃死が見られるようになった。そのため詳細な浦内の調査と水質改善策の検討がなされている。この問題は浦内の水質特性と密接に関わり、水質の変動特性は外海からの流入水に大きな影響を受けている(岡島ら, 2004)。そこで、本研究では 2002 年から着手された現地観測を 2004、2005 年も継続して行ない、浦内環境の現状を把握すると共に流動・水質特性を解明した。さらに、浦内環境を支配する流入水塩分に着目し、ニューラルネットワークと 3 次元密度流モデルを用いて外力から流入水塩分のシミュレーションを行った。その流入水塩分シミュレーション結果をもとに、流入水が浦内環境へ及ぼす影響について検討を行った。

2. 長面浦の概要と調査内容

長面浦は宮城県北東部の沿岸域に位置し、周囲が 8

km、浦面積 1.41 km²、最大水深約 10 m の海跡湖である。その概要を図-1 に示す。長面浦の特徴として、追波湾と長さ 1.7 km、水深 2 m の狭水路で結ばれる閉鎖性の強い汽水域であることと、北上川河口付近に位置し、出水時には追波湾に多量の淡水が流れ込むことが挙げられる。長面浦を囲む集水域からは数本の沢を通じて淡水の流入があるもののその量は微小であり、狭水路による潮汐の入退潮が浦内の流動環境を支配している(高崎・田中, 2004)。浦内には海水交換を促すための渚筋が存在する。

観測は浦内の St.1 と狭水路の St.2 での水位の測定、Point A, B において塩分を、Point C において溶存酸素(以下 DO)を観測する定点観測、浦内渚筋にあたる Point 1~10 で DO 鉛直分布を測定する集中観測、同じく渚筋上の流速鉛直分布を測定する流況観測を行った。また、隣接する河川である北上川河口部の風のデータと河口より上流に位置する北上大堰での流量を国土交通省より入手した。

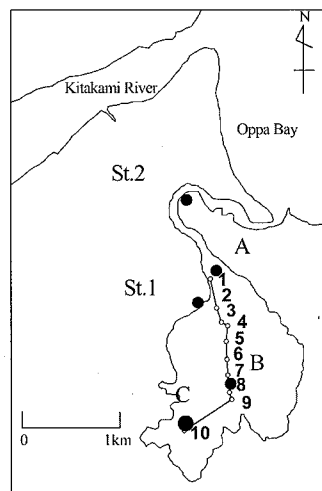


図-1 長面浦の概要と測定ポイント

1 正 会 員 修(工) 新日本空調株式会社 原子力事業部
2 学 生 員 M. Eng. 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻
3 フェロー 工博 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻
4 正 会 員 博(工) 五洋建設(株) 技術研究所
5 正 会 員 工博 石巻専修大学教授 理工学部生物生産工学科
6 正 会 員 東北大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻

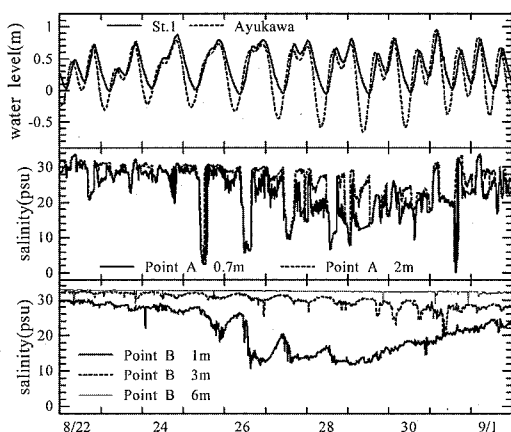


図-2 流入水塩分と浦内塩分 (2004 年)

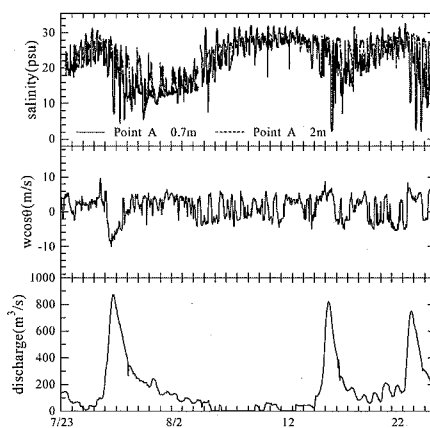


図-5 流入水塩分と流量・風速 (2005 年)

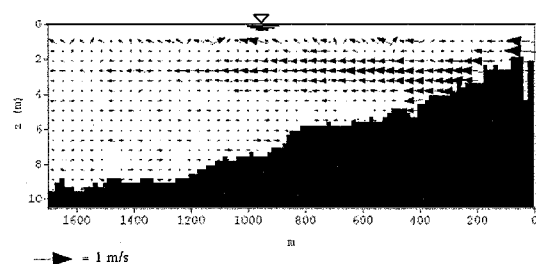


図-3 浦内流況分布 (2005 年 7 月 18 日, 上げ潮)

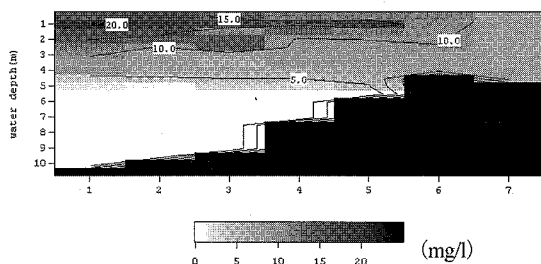


図-4 浦内 DO 分布 (2005 年 7 月 18 日, 上げ潮)

3. 浦内の流動と水質の変動特性

(1) 水質変動特性

図-2 に 2004 年 8 月 22 日から 9 月 1 日までの Point A と Point B の塩分の時系列変化を, St.1 の水位と共に示す。これを見ると 8 月 22 日においては, 夏期においても浦内塩分が表層から底層まで 30~33 psu とほぼ様な分布が続いていることがわかる。しかし, 25 日になると表層 1 m の塩分の低下が始まり, 26 日には 12 psu まで下がっている。この時の Point A の塩分を見ると, 表層塩分の低下が始まる直前の上げ潮時の塩分が 4 psu まで低下している。また, 30 日になると高塩分水が流入し, 同時に浦内表層塩分も増加している。このように

流入水塩分と浦内塩分の間には密接な関係が認められる。

(2) 浦内の流動と水質空間分布

図-3 は 2005 年 7 月 18 日の滞筋上での流速分布 (上げ潮) である。横軸は Point A を 0 m とした測定時の移動距離である。これを見ると, 流入した海水は 400 m あたりまでは底層に沿って流入し, 以降は水深約 3 m の層へ貫入し, ある程度の流速を保ちながら浦奥まで到っている様子が見て取れる。これは, 流入水が浦内の等密度の層へ流れ込むためである。

次に, 図-4 に流速観測から 2 時間後の浦内 DO 分布 (上げ潮) を示す。浦入り口部での流入海水の DO は 8 mg/l であり, 浦内の水深 3~4 m の層もほぼ同じ DO 濃度である。これは貫入層が流入水によって希釈されたからである。このように, 海水の流入により DO が変動する。なお, 水深 5 m 以深では貧酸素状態となっている。

(3) 外力との関係

上記の通り, 流入水が浦内へ大きな影響を与えることがわかった。そこで, 流入水塩分変動の支配要因に関する検討を行う。図-5 に 2005 年の流入水塩分と北上川流量と風速 w の時系列データを示す。ここで, 中段の風速については, 東から時計回りに角度 θ をとり, $w \cos \theta$ を図示している。流入水塩分が高い時は低流量であり, 流量が増加し東風が卓越すると塩分の低下が始まる。このように流入水塩分は外力の影響を受けて変動している。

4. 流入水塩分の評価

(1) ニューラルネットワーク概要と使用データ

流入水塩分は, 北上川流量と風速の影響を受け, 変動する。そこでニューラルネットワークを用いて, 浦内環境を支配する流入水塩分の評価を行った。

ニューラルネットワーク (以下 ANN) は, 人間の脳

細胞の働きをコンピューター上で再現した情報処理システムである。本研究では3層からなる階層型ネットワークを用いた。

(2) 計算結果

図-6に2003年7～9月のシミュレーション結果を示す。実測値と計算値を比較すると大きな誤差はなく、実測値の変動を良く表していると言える。計算結果では流量が増大し、東風が吹く時塩分が低下している。これは東風によって北上川から流下した淡水が追波湾奥に押し込められ、海岸線沿いを狭水路まで流れ込むためと考えられる。夏期は季節風の影響により東風が卓越し、台風や梅雨などのイベントによって降水量が多いため流量も増大しやすい。そのため流入水塩分が低下しやすい環境と言える。また、流量と風の増減が大きいため、流入海水の塩分の変動も大きい。これに応じ、浦内の貫入水深も変動しているものと推測される。

同様に2004年10～12月の結果を図-7に示す。夏期とは逆に北西の季節風の影響で西風の頻度が高く、流量も小さい。ANNによる計算結果によれば、高塩分水が安定して流入する。これは北上川の淡水が風に吹送され沖に流れやすく、狭水路に淡水が流入しにくいためである。また、風の変動が少ないため、夏期に比べて安定した塩分値となっている。

(3) 3次元密度流モデルによる検証

帰納的な手法であるANNによる検討結果から推定される長面浦への流入塩分に関する物理機構について力学モデルによる検討を加える目的で、北上川河口部、追波湾沿岸部、長面浦を対象とした3次元密度流シミュレーションを行った。ここで採用したモデルは、静水圧近似およびブシネスク近似に基づくものであり、空間に固定された層分割により鉛直方向の離散化を行うレベルモデルである。

長面浦への流入塩分が風の影響を大きく受け、東風時に低下、西風時に上昇という傾向が明確に現われている点に特に注目し、東風の吹送が続くケースと西風が続くケースを設定した。ともに風速は6 m/sとし、丸1日間、この状況が続くものとした。新北上川の流量は、両ケースとも際立った出水の生じていない時期に相当する $30 \text{ m}^3/\text{s}$ とした。計算領域全体の塩分を一律に30‰となる初期条件に対して、引潮から始まる周期12時間、振幅1 mの潮汐を与えて2潮汐の計算を行った。水平方向の計算格子 Δx 、 Δy はともに100 m、鉛直方向には、平均水面下10 mまでを1 m間隔、それ以深を5 m間隔で分割した。

図-8に2潮汐目の満潮時における表層塩分濃度の計算結果を示す。図-8(1)に示す東風のケースの結果に注目すると、新北上川からの流出水は河口右岸域に吹き寄

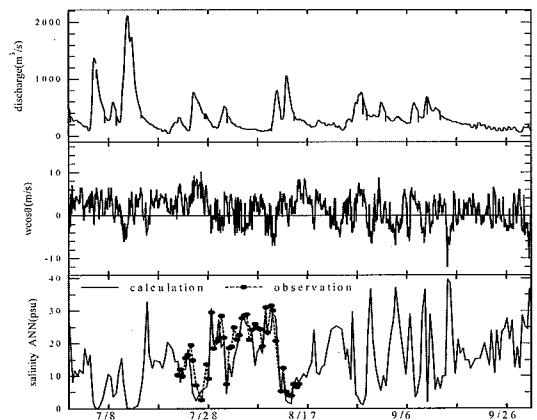


図-6 流入水塩分と流量・風速 (2003年7～9月)

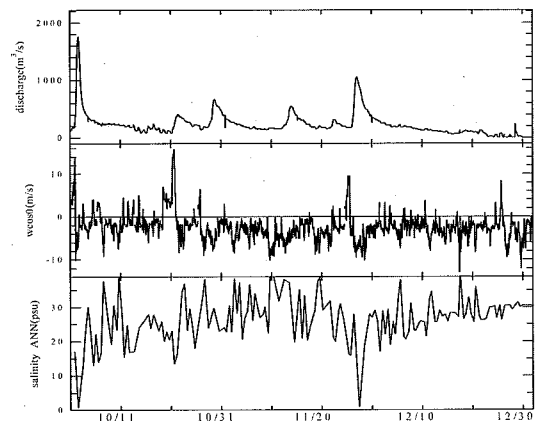
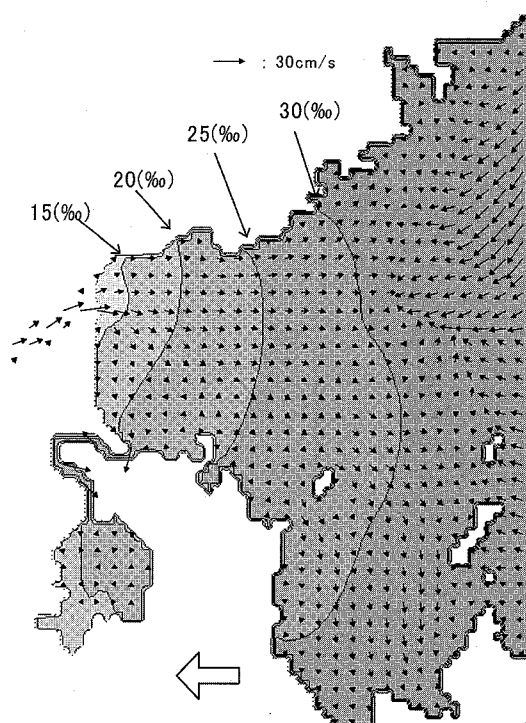


図-7 流入水塩分と流量・風速 (2004年10～12月)

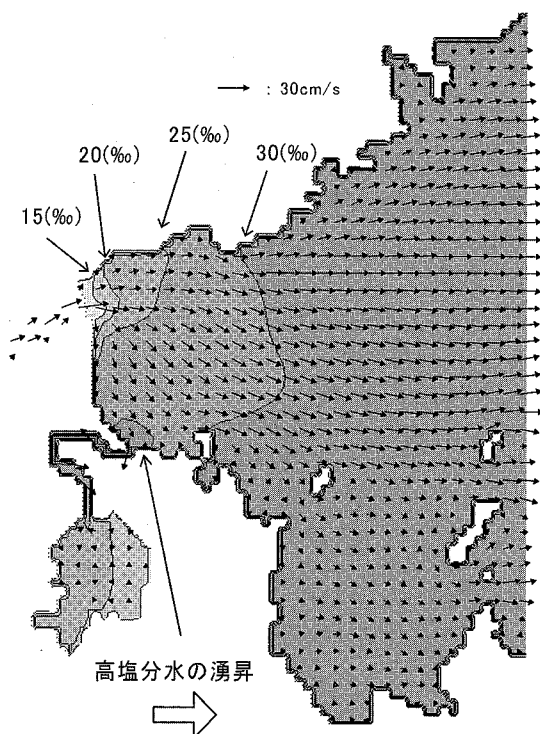
せられており、長面浦へ通じる感潮狭水路の前面の塩分濃度は低下している。また、これにはコリオリ力による右岸側への偏向も影響していると考えられる。これに対して、図-8(2)の西風のケースでは沖への吹送により右岸側への偏向が低減するため、河口右岸域では東風のケースほどの塩分低下は生じない。さらに、吹送流の補償流としての中・底層水の湧昇域が感潮狭水路前面に現われており、塩分が局所的に高くなっている。

図-9は干潮狭水路前面における塩分濃度の経時変化を示したものであるが、表層・底層ともに西風のケースのほうが高塩分となっている。基本的には潮位変動と同位相で塩分が増減しているが、西風のケースの表層塩分は潮位との関係が明確ではなく、吹送による効果が支配的であることがわかる。満潮時の塩分は、西風のケースが東風のケースに比べて、表層で9‰、底層で6‰高くなっている。

風速6 m/sでの吹送が24時間継続するという端的な



(1) 東風吹送



(2) 西風吹送

図-8 密度流シミュレーションによる表層塩分

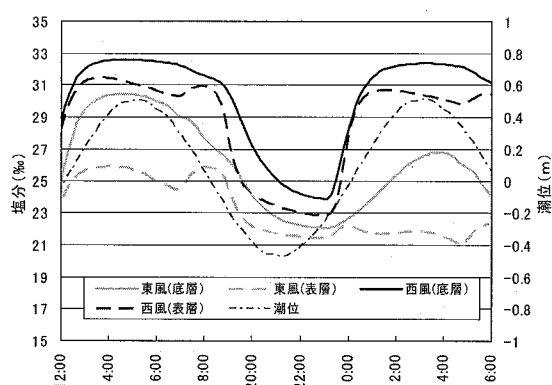


図-9 感潮狭水路前面における塩分の経時変化

条件での検討ではあるが、長面浦への流入塩分と吹送状況の間の基本的な物理機構の基本モードを捉えているものと考えられ、ANNによる解析結果を物理モデルによる検討で裏付けるものと考えられる。

5. 流入水が浦内環境へ与える影響

4. に示した様に ANN を用いることによって流入水塩分を計算できるが、流入水塩分が変動したときに浦内環境にどのような影響を与えるか、という点は重要な事柄である。そこで、流入水塩分の計算値と浦内環境の変動についての検討を行った。

(1) 貫入水深の変化

浦内に密度成層が形成されているとき、流入水は等密度層へ貫入する。そこで ANN による流入水塩分と浦内塩分分布より貫入水深を推定した。貫入水深の頻度分布を図-10 に示す。これを見ると、水深 1 m 層への貫入が最も多く、2~4 m には時折流入している。しかし 6 m 以深にはほとんど貫入していない。よって 1~4 m の表層から中層では潮汐に応じて DO が変動するが、6 m 以深では DO の変動が起らず、DO が消費され続け、貧酸素化が進むことが分かる。

(2) 流入水塩分と DO の変動

貫入水深が変化することにより、DO の分布が変動する。そこで、流入水塩分が浦内 DO 分布にどのような影響を与えるかについて検討を行った。

図-11 に流入水塩分の平均値と Point C における DO の鉛直分布積分和の関係を示す。ここで流入水塩分の平均値とは、前回のサンプリング以降の約 1 週間での流入水塩分計算値の平均であり、DO の積分和とは底層の水深 6~10 m 区間で DO 分布を積分したものである。これを見ると流入水塩分が高くなると DO が回復し、低塩分水が流入すると貧酸素化する傾向が見られる。低塩分水が流入するときには塩分成層が保持され、躍層以深

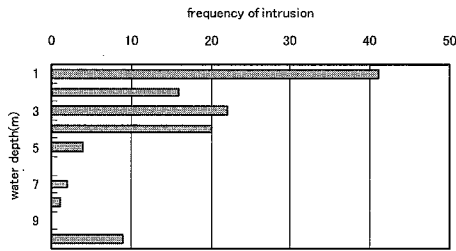


図-10 貫入水深頻度分布 (2004 年 7～9 月)

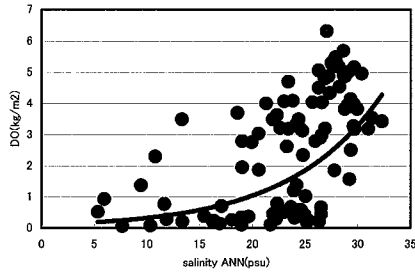


図-11 流入水塩分と DO 濃度

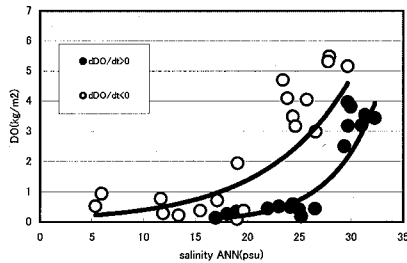


図-12 流入水塩分と DO 濃度

では滞留し DO が低下しやすくなる。逆に、高塩分水が流入する時は、鉛直方向に一様な分布になりやすく、DO が回復しやすい。

長面浦でポイントとなるのは貧酸素水塊の発生と消長という DO の挙動である。そこで、図-11 から酸素が低下する時期 ($dDO/dt < 0$) と、回復する時期 ($dDO/dt > 0$) を抽出し、流入塩分との関係を調べた。結果を図-12 に示す。酸素が低下する時期に注目すると、25 psu 以上の海水が流入している時は DO の減少は見られないが、20 psu 以下になると急激に DO が減少す

る。逆に、貧酸素が回復する時期では 25 psu 以下の流入水では DO の回復が見られない。しかし、30 psu 以上の海水の流入が続くと DO の回復が始まっている。このように、貧酸素水塊の発生には、流入水塩分が密接に関係していると言える。

6. ま と め

閉鎖性水域である長面浦での実測と、流入水塩分のシミュレーションにより、本研究で得られた結果を以下に示す

- (1) 長面浦では成層状態の時、流入水の貫入現象が見られる。貫入層では流入水によって希釈され DO などの水質が変動する。
- (2) ANN を用いて、北上川流量・風速から流入水塩分を計算した。夏期においては流量の増大と東風の影響により低塩分水が流入しやすい。逆に冬期には低流量と西風によって高塩分の流入水が続く。
- (3) 流入水塩分の変動によって貫入水深が変化する。夏期においては表層から 1～4 m の高さの層に貫入し、底層にはほとんど流入しないため貧酸素化が進む。また高塩分水の流入が続くと DO が回復しやすい傾向にある。

謝辞：本研究を行うに際し、貴重な現地データを提供頂いた国土交通省東北地方整備局北上下流河川事務所に深謝する。また、本研究の現地調査を実施するに当たり、東北大学環境水理学研究室の諸兄、石巻専修大学・高崎研究室卒研究生ならびに河北町漁業協同組合の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 入江政安・西田修三・中辻啓二・金 俊憲・湯浅楠勝(2000)：都市域近傍の閉鎖性水域における貧酸素水塊の挙動に及ぼす気象の影響，海岸工学論文集，第 50 巻，pp. 991-995。
- 岡島直也・田中 仁・金里 学・高崎みつる・山路弘人(2004)：長面浦における溶存酸素の変動機構，海岸工学論文集，第 51 巻，pp. 936-940。
- 高崎みつる・田中 仁(2004)：南三陸長面浦における溶存酸素濃度の変動に関する現地調査，水工学論文集，第 48 巻，pp. 1411-1416。